複合材料講座

複合材料の破壊力学 (Ⅲ)

影 山 和 郎*

7. 層間破壊靱性を支配している力学・材料的因子と破壊のメカニズム

層間破壊靱性に影響を与える力学・材料的因子としては、荷重モード、負荷速度、残留応力、環境（温度、水分など）、繊維および樹脂の種類、成形方法、プライ厚さ、繊維配向角、織物材の場合は織組織、積層構成、板厚等が挙げられよう。このような力学・材料的諸因子に加え、図 23 の模式図に示すように、樹脂の延性変形と破壊、繊維/樹脂界面の破壊、繊維の破壊、繊維のブリッジング、き裂面のキンク、はく離面の摩擦等、複数の微視的破壊様式が複雑に関連し合っ、層間はく離き裂進展特性を特徴付けている。また評価法の観点からは、挿入フィルムの厚さや予き裂導入条件が得られる層間破壊靱性値に少なからず影響する。スタータき裂として挿入されたフィルムが厚いと、図 24 に模式的に示すようにはく離き裂先端には樹脂リッチ領域が形成され、これは（みかけの）層間破壊靱性を向上させる傾向がある。一方、フィルム先端から予き裂を進ませると、繊維のブリッジングが生じる場合があり、その時も得られた層間破壊靱性値は真の値より高めに評価される恐れがある。

層間破壊は複合材料の代表的破壊様式であるが、単一の破壊様式として分類されるべきでなく、複合破壊様式の一つとして理解すべきであると思われる。一般に層間破壊靱性は成形条件に敏感であるといわれるが、それは成形条件が破壊様式の遷移に大きく関係しているためと解釈できよう。

これら力学・材料因子と微視破壊様式に関連させながら、層間破壊靱性を整理する試みがなされるようになってきたが（例えば文献⁵⁷⁻⁶⁰⁾）、相互の効果を体系化して理解するまでには至っていないように思われる。ここでは、材料評価、設計のための基礎データを提供するという観点から、以下の項目について文献データの一部を紹介

図 23 層間はく離き裂進展における微視的破壊様式

図 24 挿入フィルム先端の樹脂リッチ領域

介したい。

8. 静的層間破壊特性

8.1 モード I 層間破壊靱性

Wilkins らによる DCB 試験が初期の研究として位置付けられよう。それ以後、ASTM STP に掲載された層間破壊靱性に関する研究の代表的なもの、および欧州 (EGF)⁴⁸⁾ と日本 (JIS)⁴⁶⁾ で実施された標準化研究の成果から入手可能なデータを参考に、静的モード I 層間破壊靱性値の一覧表を作成して表 1 に示す。材料は一方向強化 0° 材あるいは直交織物材で、強化繊維は炭素繊維を中心にガラス繊維とアラミド繊維を含んでいる。わかっているものについては、繊維体積含有率 V_f 、長手方向弾性率 E_L も示した。 G_{IC} と G_{IR} は、各々はく離き裂進展開始および進展中のモード I 層間破壊靱性である。

初期の研究では、進展開始時の値はほとんど注目され

* Kazuro KAGEYAMA: 東京大学工学部船舶海洋工学科 (113 文京区本郷 7-3-1)

表1 モードⅠ層間破壊特性

No.	繊維	樹脂	積層	Vf (%)	EL (GPa)	GIC (kJ/m ²)	GIR (kJ/m ²)	試験者	文献
1	Thornel 300	Epoxy 5208	[0]24 UD	68			0.088	Wilkins et al	ASTM STP 775, p.168
2	T300	Epoxy5208	[0]24 UD		137.9		0.102	Ramkumar & Whitcomb	ASTM STP 876, p.315
3	AS4	Epoxy 3501	[0]24 UD				0.203	Aliyu & Daniel	ASTM STP 876, p.336
4	AS1	Epoxy 3501-6	UD		125.0		0.132	Russel & Street	ASTM STP 876, p.349
5	AS1	Epoxy 3502	UD				0.148	Browning et al	ASTM STP 893, p.256
6	AS4	Epoxy 3502	UD				0.170	同上	同上
7	T300	Epoxy F185	[0]24 UD				0.188	Daniel et al	ASTM STP 937, p.260
8	AS1	Epoxy 3401-6	t=3mm UD	62		0.110	0.190	Russel & Street	ASTM STP 937, p.275
9	AS4	Epoxy 2220-3	t=3mm UD	61		0.160	0.255	同上	同上
10	C6000	Toughened Epoxy F155	t=3mm UD	51		0.495	0.510	同上	同上
11	AS4	PEEK	t=3mm UD	66		1.330	1.540	同上	同上
12	E-glass	DGEBA	UD	60	46.0	0.264	0.515	Prel et al	ASTM STP 1012, p.251
13	T300	Epoxy 914	UD	55 - 60	141.0	0.185	0.176	同上	同上
14	AS4	PEEK	UD	61	134.0	1.460	2.400	同上	同上
15	T300	Epoxy 3100	[0]24 UD		125.5	0.170		Mall et al	ASTM STP 1012, p.296
16	IM6	Toughened Epoxy R6376	[0]24 UD		134.5	0.473		同上	同上
17	AS4	PEEK	[0]24 UD		119.3	1.205		同上	同上
18	AS4	PC	[0]24 UD	55.8	122.0	1.296		Hinkley et al	ASTM STP 1044, p.251
19	XAS	PC	[0]24 UD	55.1	131.0	0.893		同上	同上
20	AS4	TPI blend	[0]24 UD	56.5	143.0	0.490		同上	同上
21	AS4	Polyimide Sulfone blend	[0]24 UD	52	127.0	0.665		同上	同上
22	Carbon	Epoxy	UD			0.115	0.203	Witich (EGF RRT)	ICCM/8,28-C-1
23	Carbon	Epoxy	Cloth				0.64	同上	同上
24	Carbon	PEEK	UD			1.406	1.707	同上	同上
25	Carbon	PEEK	Cloth				1.700	同上	同上
26	Carbon	PES	UD			1.130	2.200	同上	同上
27	CF	PA12	UD				1.700	同上	同上
28	Carbon	PEI	Cloth				2.530	同上	同上
29	Glass	PA12	UD				1.400	同上	同上
30	Glass	PP	UD				1.200	同上	同上
31	Aramid	EP	Cloth				1.010	同上	同上
32	Aramid	PEI	Cloth				2.430	同上	同上
33	HTA-1200	Epoxy Toho113	[0]22 UD	67.5	117.6	0.113	0.127	JIS ラウンドロビン	高分子素材センター
34	T400HB	Epoxy 2500	[0/90]16 Cloth	59.9	63.5	0.400	0.42	同上	同上
35	IM-600	Toho 134	UD			0.308	0.458	同上	同上
36	AS4	PEEK	UD			1.610	1.57	同上	同上

ておらず、進展中の層間破壊靱性値しか求められていない。これら初期の研究で取り扱われた炭素繊維/エポキシは開始から進展中を通して靱性値はほぼ一定であり、その値も $0.1 \sim 0.2 \text{ kJ/m}^2$ と極めて低い数値を示している。その後層間破壊靱性が改善された複合材料が登場してくると、進展開始と進展中の靱性値の差異が注目され、さらに進展開始の靱性値に関心が移っていく様子が ASTM STP のデータからうかがえる。材料開発の経過が評価技術に反映している例として興味深い。最近のデータでは G_{IC} で 1.0 kJ/m^2 を越える材料も珍しくなくなっている。また、樹脂の種類、一方向材と織物材で値が大きく異なること、一般に高靱性のものほど G_{IC} と G_{IIR} の差が大きいことなども表から理解されよう。

図 25 にモードⅠはく離き裂進展抵抗 (R -カーブ) の例を示す⁶¹⁾。供試材はいずれも一方向炭素繊維強化 0° 材である。き裂進展とともに G_{IIR} が増加する理由は主として繊維のブリッジングの影響と思われる。

8.2 モードⅡ層間破壊靱性

モードⅡの試験は初め CLS 試験で代用されていたが、

Russell らの提案以来 ENF 試験片が多く用いられるようになり、最近の一部 ELS 試験も実施されるようになってきた。これらの経緯は、表 2 に示したモードⅡ層間破壊靱性値のデータからも理解できる。調査した文献は表 1 と同様に、ASTM STP、EGF と JIS のラウンドロビン試験報告^{48,49)}である。初期の ENF 試験では、最大荷重における靱性値のみが評価されていたが、その後はく離き裂進展開始が注目されるようになり、さらに進展中の G_{IIR} も測定されるようになるなど、樹脂の高靱化にともない評価技術の高度化が要求された様子もみてとれよう。

図 26 にモードⅡはく離き裂進展抵抗 (R -カーブ) の例を示す⁶²⁾。これらの試験はすべて CSD 制御による安定化 ENF 試験によってなされたもので、はく離き裂長さの測定には修正コンプライアンス較正法を用いている。図中には荷重-CSD 線図より判定した各種限界点が O で示してある。高靱化エポキシ系の T800H/3900-2 の高い G_{IIR} は特筆すべきであろう。

図25 モードⅠ層間はく離き裂進展抵抗 (R-カーブ) の例⁶¹⁾

表2 モードⅡ層間破壊特性

No.	繊維	樹脂	積層	Vf (%)	EL (GPa)	GIIc (kJ/m²)		GIIIR (kJ/m²)	試験者	文献
						進展開始	最大荷重			
1	Thornel 300	Epoxy 5208	疑似等方	68		CLS test→		0.155	Wilkins et al	ASTM STP 775, p.168
2	T300	Epoxy5208	疑似等方		137.9	CLS test→		0.374	Ramkumar & Whitcomb	ASTM STP 876, p.315
3	AS1	Epoxy 3501-6	[0]24 UD		125.0		0.450		Russel & Street	ASTM STP 876, p.349
4	AS1	Epoxy 3401-6	t=3mm UD	62			0.605		Russel & Street	ASTM STP 937, p.275
5	AS4	Epoxy 2220-3	t=3mm UD	61			0.750		同上	同上
6	C6000	Toughened Epoxy F155	t=3mm UD	51			0.900		同上	同上
7	AS4	PEEK	t=3mm UD	66			1.765		同上	同上
8	AS4	Epoxy 3502	[0]24 UD				0.590		Corleto & Bradley	ASTM STP 1012, p.201
9	T6C145	Toughened Epoxy F185	[0]24 UD				2.350		同上	同上
10	S2-glass	Epoxy SP250	[0]24		43.5		1.330		O'Brien et al	ASTM STP 1012, p.222
11	T300	Epoxy BP907	[0]24		118.0		1.530		同上	同上
12	AS4	PEEK	[0]24		146.4		2.680		同上	同上
13	E-glass	DGEBA	UD	60	46.0	1.715			Prel et al	ASTM STP 1012, p.251
14	T300	Epoxy 914	UD	55 - 60	141.0	0.518			同上	同上
15	AS4	PEEK	UD	61	134.0	1.109		3.678	同上	同上
16	T300	Epoxy 3100	[0]24 UD		125.5		0.548		Mall et al	ASTM STP 1012, p.296
17	IM6	Toughened Epoxy R6376	[0]24 UD		134.5		0.650		同上	同上
18	AS4	PEEK	[0]24 UD		119.3		1.502		同上	同上
19	T300	Epoxy 2500	[0]12 UD	60	113.0	0.558	0.585	0.650	Kageyama et al	ASTM STP 1110, p.210
20	IM6	Epoxy/Bismaleimide 5245C	UD			0.554	0.770	0.696	Russell	ASTM STP 1110, p.226
21	IM7	Epoxy/Rubber 8551-7	UD			0.796	1.193	1.059	同上	同上
22	AS4	PEEK	UD			1.287	2.752	2.516	同上	同上
23	Carbon	Epoxy	UD			0.528			Wittich (EGF RRT)	ICCM/8, 28-C-1
24	Carbon	Epoxy	Cloth			4.970			同上(ELS)	同上
25	Carbon	PEEK	UD			2.033			同上	同上
26	Carbon	PEEK	Cloth			5.830			同上(ELS)	同上
27	Carbon	PES	UD			1.850			同上	同上
28	Carbon	PEI	Cloth			6.400			同上(ELS)	同上
29	Glass	PA12	UD			1.900			同上(ELS)	同上
30	Aramid	EP	Cloth			3.490			同上(ELS)	同上
31	Aramid	PEI	Cloth			4.950			同上(ELS)	同上
32	HTA-1200	Epoxy Toho113	[0]22 UD	67.5	117.6	0.409	0.436	0.469	JIS ラウンドロビン	高分子素材センター
33	T400HB	Epoxy 2500	[0/90]16 Cloth	59.9	63.5	0.456	1.110		同上	同上
34	IM-600	Toho 134	UD			1.240	2.610	2.495	同上	同上
35	AS4	PEEK	UD			1.540	1.960	2.898	同上	同上

(a) T300/2500

(b) AS4/PEEK

(c) T800H/3900-2

図 26 モード II 層間はく離き裂進展抵抗 (R-カーブ) の例⁶²⁾表 3 モード I 層間破壊靱性 G_{IC} に及ぼす繊維配向角の影響

繊維配向角 (deg)	G_{IC} (kJ/m ²) 平均 (標準偏差)
[0/0]	0.194 (0.013)
[30/-30]	0.203 (0.021)
[60/-60]	0.218 (0.023)
[0/90]	0.285 (0.052)
[(90/90)/(0/90)] 平織材	0.517 (0.040)

8.3 層間破壊靱性に及ぼす繊維配向角の影響

層間破壊靱性試験データは、一方向強化 0° 材あるいは織物材に関するものがほとんどであるが、実際に問題となるのは、層間応力が生じやすい異なる積層角間の層間はく離である。末益ら⁵⁷⁾は、逆対称積層した 8 枚朱子積層板について、縦糸の方向 θ がモード I 層間破壊靱性に及ぼす影響を調べており、 θ の影響がそれほど顕著でないが、 $\theta=45^\circ$ で最小となることを示している。

一方向強化材における $\pm\theta$ 層間の破壊靱性を求めようとすると、積層構成は一般に非対称となるため、試験片の変形は曲げにねじりも加わった複雑なものとなる。この問題を避けるため、張ら⁶⁰⁾は対称積層を中央面に関して逆対称配置した (例えば、 $[\theta/-\theta/0_n/-\theta/\theta/-\theta/\theta/0_n/\theta/-\theta]$ 、ただし $//$ ははく離き裂の位置を表す) 積層板を用い、DCB 試験によるモード I 層間破壊靱性評価を行っている。この積層構成では、分割はりの変形にねじりが生じることもなく、成形後のまげ・ねじり熱変形も生じないことが理論的に確かめられている。

$\theta=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ について $\pm\theta$ 層間でのはく離き裂進展開始のモード I 破壊靱性値 G_{IC} を平織 [(0/90)_n]s 材の結果とともに表 3 に示す。ただし $\theta=90^\circ$ の場合の

図 27 繊維配向角が R-カーブに及ぼす影響⁶⁰⁾

図28 混合モード層間破壊靱性の測定例⁶³⁾

み, $90^\circ/90^\circ$ の層間ではなく $0^\circ/90^\circ$ 層間のき裂進展となっている。 θ が増加するほど, G_{IC} は増加するが, 同時にばらつきも大きくなる傾向がある。 平均値の増加と標準偏差の増加がほぼ同程度であること, $0^\circ/0^\circ$ 層間が最小値を与えることより, 強度設計においては通常の $0^\circ/0^\circ$ 層間の G_{IC} データが, 異なる繊維配向角の層間の層間破壊解析に有効に適用できるという知見を得ている。 一方, はく離き裂進展の R -カーブについては, 図27に示すように, 繊維配向角 θ の影響が顕著であり, θ が増加するにつれてばらつきも増加するが, 著しい進展抵抗の向上が観察されている。

8.4 混合モード層間破壊靱性

Reeder⁶³⁾ による MMB 試験によって得られた混合モード層間破壊靱性の結果を図28に示す。 供試材料の強化繊維はいずれも炭素繊維, マトリックス樹脂は低靱性エポキシ (AS4/3501-1), 高靱性エポキシ (IM7/977-2) および PEEK (AS4/PEEK) である。 AS4/PEEK では限界曲線がほぼ1本の直線で近似できるのに対し, エポキシ系の CFRP では, ある程度 G_{II} が作用したほうが G_I の限界値が増加する現象が観察されている。 Reeder は, このような破壊限界曲線を記述するための混合モード破壊条件について考察し, 2直線近似による方法を提案している。

混合モードにおけるデータのばらつきがやや大きいこと, 供試材の種類がまだ少ないことなど, 設計上重要と思われる混合モード破壊条件に関しては, 今後より詳細な検討が必要と思われる。

図29 疲労はく離き裂進展速度と応力拡大係数の関係⁶⁴⁾

(T300/3631, T800/3631)

9. 疲労はく離き裂進展特性

強化繊維が異なる2種類の一方向炭素繊維強化エポキシ積層板, T300/3631 と T800/3631 について, 応力比 $R(=K_{min}/K_{max})$ を 0.2 と 0.5 に変えた場合について, 疲労はく離き裂伝ば速度と応力拡大係数範囲 $\Delta K(=$

図30 疲労はく離き裂進展速度と応力拡大係数の関係⁶⁴⁾
(AS4/PEEK)

図31 等価応力拡大係数 K_{eq} を用いた疲労はく離き裂進展速度の整理⁶⁴⁾

$K_{max}-K_{min}$ の関数を、図29に示す⁶⁴⁾。式(22)のべき指数 m は70~230と非常に大きな値をとる。またこのデータから本供試材の場合、工学的には $da/dN=10^{-11}$ m/cycle における値を下限界値 ΔK_{th} としてもさしつかえないと考えられる。図30にAS4/PEEK (APC-2) 積層板の da/dN と ΔK の関係を示す。 $da/dN > 10^{-10}$

図32 疲労はく離き裂進展開始 (AS4/PEEK)⁵²⁾

~ 10^{-9} m/cycle の領域でべき乗の関係が成立し、べき指数 m は10~12である。熱硬化性から熱可塑性と樹脂靱性の向上にともない、べき指数 m が低下している。

式(50)で定義されるパラメータ γ を用いた等価応力拡大係数範囲 ΔK_{eq} を用いた整理結果を図31に示す。 ΔK_{eq} は応力比が0の場合の ΔK に相当するパラメータと理解することができる。 ΔK_{eq} を用いることにより、応力比によらない da/dN との応力拡大係数範囲の関係を求めることができる。各種 CFRP 積層板の下限界値と樹脂および積層板の破壊靱性値を γ の値とともに表4に示す。おおまかな傾向として積層板および樹脂の K_{I0} が高くなるにつれて γ の値が小さくなっている。すなわち、靱性の高い積層板では、疲労はく離き裂進展が ΔK に主として支配されているのに対し、脆性的な積層板では K_{max} 支配に近くなっていることを示し、疲労破壊機構の違いと対応している⁶⁴⁾。

図32に、疲労はく離き裂が進展開始するまでの繰返し数を横軸に、その時のモードIエネルギー解放率の最大値 $G_{I_{max}}$ を縦軸にとって示す⁵²⁾。供試材はAS4/PEEK (APC-2)、試験方法は $R=0.1$ のDCB試験である。 10^6 cycle までにはく離疲労き裂が進展しない下限界 $G_{I_{th}}$ は $0.7 \sim 1.0$ in-lb/in² ($0.12 \sim 1.8$ kJ/m²) となり、静的なモードI層間破壊靱性値 ($10 \sim 14$ in-lb/in²) の1/10から1/20になっている。

10. おわりに

Wilkins らの論文が ASTM STP に掲載されたのが1982年であるから、層間破壊靱性の研究は本格的な着手からまだ十余年の歴史しか有していない。このように比較的新しい研究分野にもかかわらず、今日まで多数の研究者によって着実な研究成果が挙げられているのは、樹脂系複合材料に対する高靱化の要求がそれだけ高いことを

表4 各種 CFRP 積層板の疲労はく離き裂進展下限界特性

材 料	CFRP 積層板				樹脂単体
	K_{IC} (MPam ^{1/2})	ΔK_{eqth} (MPam ^{1/2})	$\Delta K_{eqth}/K_{IC}$	r	K_{IC} (MPam ^{1/2})
T300/914	1.4	0.75	0.54	0.86	0.58
T300/#2500	1.7	0.68	0.40	0.51	—
T300/#3601	1.0	0.76	0.76	0.82	0.56
T800/#3601	1.0	0.77	0.77	0.88	0.56
T300/#3631	1.3	0.84	0.65	0.74	0.67
T800/#3631	1.4	0.85	0.61	0.66	0.67
AS4/PEEK	4.7	1.2	0.25	0.36	2.9

示している。1986年から1年間、著者が米国デラウェア大学複合材料センター (CCM) で海外研究に従事する機会を得た頃、複合材料の特性評価に関する CCM での研究テーマを調べてみたが、その半数以上が破壊力学となんらかの関連を持つものであった。破壊力学を複合材料に適用しようという試みが当時から極めて活発であったことを物語っている。近年の研究の傾向を概観すると、材料特性評価から設計への応用へ、破壊力学的研究の関心が移ってきているようにも感じられる。その意味では破壊力学も複合材料工学の中で着実に地歩を占めつつあるといえよう。

本講座の内容は、基礎理論と評価方法が中心であったが、損傷許容設計への応用を考えた場合の方向についても言及したつもりである。この拙文が破壊力学特性評価あるいは設計に携わる方々の研究の糸口にもなれば幸である。

なお、本講座を執筆するにあたって、有益なご助言および貴重なデータを頂いた、工業技術院製品科学研究所の北條正樹氏、石川島播磨重工業の張惟教氏に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 57) 末益博志, 神津正明, 柴 健一: 日本複合材料学会誌, **15**, 6 (1989), 266-272.
- 58) 北條正樹, 田中啓介, C.-G. Gustafson, 林 龍一: 日本機学会論文集 (A編), **56**, 526 (1990), 1335-1342.
- 59) M. Hojo, K. Tanaka, C.-G. Gustafson & R. Hayashi: *Compos. Sci. Tech.*, **29** (1987), 273-292.
- 60) 張 惟教, 金原 勲, 影山和郎, 大沢 勇: 第6回破壊力学シンポジウム講演集, (1991), pp.254-259 (材料, **41**, 467 (1992) 掲載予定).
- 61) K. Kageyama & M. Hojo: *Proc. 5th Japan-U.S. Conf. Compos. Mater.*, Tokyo (1990), pp. 227-234.
- 62) 樺島重憲: 東京大学大学院船舶海洋工学専攻修士論文, 東京大学 (1992).
- 63) J.R. Reeder: *An Evaluation of Mixed Mode Delamination Failure Criteria*, NASA TM 1-4210 (1992).
- 64) 北條正樹: 第41回応用力学連合講演会, 東京 (1992), pp. 239-242.